ارزیابی الگوی بارگذاری مستطیلی در تحلیل غیرخطی پل‌های با عرشه مختلط تحت اثر انفجار★

علیرضاحبیبی[۱]   نیما خالدی[۲]

چکیده *با وجود پیشرفت‌های چشم‌گیری که در مورد تحلیل انفجار وجود دارد، کاربردهای تحلیل غیرخطی سازه‌ها تحت اثر انفجار به قاب-ها محدود می‌شود و رفتار سازه‌ای پل‌ها تحت انفجار موضوعی است که در سال‌های اخیر توجه محققان را به‌خود جلب نموده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌تواند دقیق‌ترین پاسخ‌های سازه را تحت اثر انفجار نتیجه دهد ولی استفاده از آن در بیشتر موارد به‌دلیل پیچیدگی و زمان‌های محاسباتی بیش از حد آن منطقی نیست.روش بار افزون به‌عنوان یک راه حل مناسب و جالب برای تحلیل غیرخطی به‌دلیل سادگی و توانایی آن برای تخمین تقاضای تغییرشکل با دقت قابل‌قبول بدون تلاش محاسباتی و مدل‌سازی حجیم تحلیل دینامیکی غیرخطی مطرح است. در این تحقیق، یک الگوی بارگذاری مستطیلی برای تخمین پاسخ‌های غیرخطی پل‌های مرکب تحت اثر انفجار با استفاده از روش بار افزون توسعه داده می‌شود. به این منظور ابتدا یک روش مؤثر برای معادل‌سازی استاتیکی بارگذاری انفجار پیشنهاد می‌گردد و سپس به ارزیابی دقت تحلیل استاتیکی غیرخطی براساس الگوی بارگذاری توسعه‌یافته پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از آن است که روش پیشنهادی می‌تواند به سادگی برای تخمین محافظه‌کارانه‌ی تغییرمکان حداکثر پل‌های فولادی با عرشه‌ی مختلط در اثر بارگذاری انفجار به‌کار رود.*

واژه های کلیدی تحلیل دینامیکی غیرخطی، تحلیل بار افزون، بارگذاری انفجار، پل‌های مختلط.

Evaluating Rectangular Loading Pattern in Nonlinear Analysis of Composite Bridgesunder Blast

A. R. Habibi   N.Khaledy

Abstract *While significant advances have been made on the blast analysis, applications of nonlinear analysis of structures under explosion have been limited to the frames and structural behavior of bridges subjected to blast is an issue that has attracted attention of researchers in recent years. Nonlinear dynamic analysis can be lead to the most accurate responses of the structure under blast but the use of it is not justified in many cases because of its complexity and excessive computing times. Pushover method is often seen to be a viable and attractive alternative to nonlinear analysis because of its simplicity and ability to estimate deformation demands with acceptable accuracy without the intensive computational and modeling effort of a nonlinear dynamic analysis. In this study, a rectangular load pattern is developed to estimate nonlinear responses of composite bridges subjected to blast using pushover method. For this purpose, first, an efficient method is proposed to determine equivalent static blast loading and then the accuracy of pushover analysis based on the developed load pattern is evaluated. It is shown that the proposed method can be easily used to conservatively estimate maximum displacement of composite steel girder bridges under explosion.*

Keywords Nonlinear Dynamic Analysis, Pushover Analysis, Blast Loading, Composite Bridges.

★ تاریخ دریافت مقاله و ۹۲/۱/۱۰ تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۰/۷ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان.

(۲) دانشجوی دکتری عمران– سازه، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد.

مقدمه

راه‌ها، بزرگ‌راه‌ها و پل‌هازیر بنای سیستم حمل و نقل در هر کشور را تشکیل می‌دهند و در این میان پل‌ها از اهمیت خاصی برخوردارند. پل‌ها در جاده‌ها، خطوط راه‌آهن، روگذرها و زیرگذرهای داخل شهر، بزرگ‌راه‌ها و آزادراه‌ها مورد استفاده قرار می گیرند. پل‌ها در جنگ‌ها و حملات تروریستی همیشه از اهداف مهم برای حمله بوده‌اند. تخریب یک پل می‌تواند منجر به خسارات جانی و مالی فراوانی شود. می‌تواند دسترسی به یک محل را تا مدت‌ها مختل کندو باعث اختلال در حمل و نقل شود. در هنگام وقوع بحران، پل‌ها نقش مهمی در امدادرسانی یا تخلیه‌ی یک منطقه‌ی دچار بحران را از افراد ایفا می کنند. در دنیای امروز با بالارفتن خطرات جنگ و حملات تروریستی در سرتاسر جهان تحلیل و طراحی پل‌ها در برابر انفجار ضروری به‌نظر می‌رسد. تاکنون تحقیقاتی که روی اثر انفجار بر سازه‌ها انجام شده است عمدتاً به ساختمان‌ها محدود می‌شوند و تحقیقاتی که به‌طور خاص بر روی رفتار پل‌ها در مقابل انفجار تمرکز داشته‌اند، فقط در چند سال اخیر انجام شده است و تعداد این پژوهش‌ها بسیار محدود و انگشت شمار است.به‌دلیل پژوهش‌های اندک در این زمینه، هنوز ابهامات زیادی در خصوص عملکرد پل‌ها در برابر انفجار وجود دارد. بنابراین با توجه به جدید بودن و اهمیت بالای موضوع، تحقیقات در زمینه‌ی تحلیل و طراحی پل‌ها در برابر انفجار ضروری است.

از نخستین مطالعات مرتبط با انفجار می‌توان به مطالعات ارنشاو بر روی صوت و امواج صوتی در سال ۱۸۵۸ اشاره کرد[1]. در همان سال‌ها توماس لمب ریاضی‌دان انگلیسی مطالعات زیادی در خصوص هیدرودینامیک و گسترش امواج انجام داده بود[2].لمب به‌دلیل تسلطش بر هیدرودینامیک، گسترش امواج، تغییر شکل الاستیک ورق‌ها، و بعدها تئوری صوت مشهور بود. در سال ۱۹۱۵ هاپکینسون به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر امواج انفجار پرداخت و فرمولی برای محاسبه‌ی فاصله‌ی مقیاس‌شده‌ی انفجار که تابعی از شدت انفجار و فاصله‌ی آن تا ساختمان مورد نظر بود ارائه داد [3].اگرچه این فرمول پایه‌ی ریاضی نداشت ولی از نظر کلاسیک دارای اهمیت بود. در سال‌های بعدی به‌خصوص در دهه‌ی ۱۹۴۰، سه کشور شوروی، آلمان و آمریکا مشغول انجام تحقیقات علمی برروی انفجار بودند، اما مهم‌ترین تحلیل انفجار توسط تیلور در زمان جنگ جهانی دوم، برای وزارت امنیت داخلی انگلستان انجام شد [4]. وی در تحقیقش یک بمب استوانه‌ای را در نظر گرفت که از یک انتهایش به سمت انتهای دیگر شروع به انفجار می‌کرد. با افزایش فشار داخل محفظه، جداره‌ی بمب منبسط می‌شود و وقتی که گسیخته می‌شود، گازهای حاصل از انفجار خارج می‌شوند و تشکیل یک ناحیه‌ی داغ را می‌دهند که به‌سرعت منبسط می‌شود و باعث ایجاد امواج مافوق صوت می‌گردد. تیلور هم‌چنین تحقیقات ارزشمند دیگری در اوایل جنگ جهانی دوم، در زمینه‌ی دینامیک امواج مافوق صوت (Shock wave) انجام داد [5,6].

از منابع و مراجع مهمی که تاکنون در زمینه‌ی تحلیل و طراحی سازه‌ها در برابر انفجار تدوین شده‌اند می‌توان به نشریه‌ی TM 5-1300[7]، نشریه‌ی TM 5-855-1[8]، نشریات FEMA 426,427,428 [9,10,11]، نشریه‌ی شماره‌ی ۴۲ انجمن مهندسان عمران آمریکا [12]، راهنمای طراحی سازه‌ای مقاوم در برابر انفجار در تأسیسات پتروشیمی [13]، طراحی سازه‌ای برای حفاظت فیزیکی [14] و نشریه‌ی توصیه‌های امنیت پل توسط مؤسسه آشتو [15] اشاره کرد. در این میان تنها نشریه‌ای که مستقیماً برای پل‌ها تدوین شده است، نشریه‌یتوصیه‌های امنیت پل است که در سال ۲۰۱۱ توسط آشتو منتشر شده است و تأکید آن بیشتر بر پایه‌ی پل‌هاست.

تحقیقاتی که به‌طور خاص به بررسی انفجار در

پل‌ها پرداخته‌اند بسیار محدود و انگشت‌شمار هستند و این نکته در معدود مقالات مرتبط نیز خاطر نشان شده است. تحقیقات مهمی که تاکنون بر روی پل‌ها انجام گرفته‌اند و یا می‌توان از نتایج آن ها در پل‌ها نیز استفاده کرد به شرح زیر هستند:

در سال ۲۰۰۵، انوارالاسلام و نور یزدانی به ارزیابی عملکرد پل‌های ساخته شده با تیرهای پیش‌تنیده‌ی آشتو تیپ۳ که براساس آیین‌نامه‌ی آشتو و در برابر زلزله طراحی شده بودند، در برابر انفجار پرداختند [16]. نتیجه این بود که این پل‌ها در برابر انفجارهای احتمالی متعارف مقاومت نخواهند کرد. آن‌ها یک پل دودهانه با دوخط عبور را که با استفاده از تیرهای پیش‌تنیده‌ی آشتو تیپ ۳ طراحی شده بودند با استفاده از نرم‌افزار STAAD مدل کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تیر، سرستون و ستون‌های پل‌های مورد مطالعه در برابر انفجار معمولی نمی‌توانند مقاومت کنند.

در سال ۲۰۰۸ فوجیکارا و برونیو به ارزیابی عملکرد پایه‌ی پل‌های معمول طراحی شده براساس بارهای زلزله در برابر انفجار پرداختند [17]. آن‌ها یک سری آزمایش با مقیاس ¼ را روی ستون‌های بتن مسلح انجام دادند. آن‌ها دو نوع ستون را مورد بررسی قرار دادند، ستون‌های بتن مسلح شکل‌پذیر(از لحاظ لرزه‌ای) و ستون‌های غیرشکل‌پذیر با پوشش فولادی. آن‌ها مشاهده کردند که هیچ یک از این ستون‌ها رفتار شکل‌پذیری در برابر انفجار از خود نشان ندادند و دچار گسیختگی برشی در پای ستون شدند.

در سال ۲۰۰۸ عبدالأحد و آروکیاسامی ظرفیت پل‌های با سیستم عرشه‌ی دال بتنی و تیر T شکل را در برابر انفجارهای ضعیف و متوسط مورد بررسی قرار دادند [18]. آن‌ها هم‌چنین اثر الیاف FRP را در بالا بردن ظرفیت پل در اثر انفجار بررسی کردند. از نتایج مهم تحقیق آن‌ها این بود که استفاده از بتن با مقاومت بالا تأثیر چندانی در افزایش مقاومت پل در برابر انفجار نداشت و هم‌چنین الیاف FRP تأثیر بسیار خوبی در بالا بردن ظرفیت پل ایجاد کردند.

در سال ۲۰۰۹ دنگ و جین آسیب وارد به پل‌ها در اثر انفجار را به‌صورت عددی شبیه‌سازی کردند[19]. آن‌ها پل مینپو(Minpu) را در شانگهای که پلی کابلی و دارای عرشه‌ی خرپایی فولادی است به‌صورت المان محدود و به‌کمک نرم‌افزار AUTODYN شبیه‌سازی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که خرابی‌های ایجاد شده موضعی و در نزدیک منبع انفجار بودند.

در سال ۲۰۰۹ احمد و نور تحقیقاتی در مورد «پاسخ پل‌ها دراثر بارگذاری انفجار و روش‌های محافظت برای کاهش خطرات ناشی از انفجار در پل‌ها» انجام دادند [20]. آن‌ها ابتدا طیف‌های بارگذاری معادل استاتیکی را برای دستگاه یک درجه آزادی الاستیک تهیه نمودند. برای در نظر گرفتن اثرات پلاستیسیته، طیف حاصل را بر فاکتور شکل‌پذیری که تابعی است از شاخص شکل‌پذیری تقسیم کردند. سپس به مدل‌سازی پل با استفاده از نرم‌افزار ELS پرداختندو راهکارهایی برای کاهش خطرات انفجار در پل‌ها ارائه کردند.

در سال ۲۰۰۹، ژو و آروکیاسامی نحوه‌ی ارزیابی اثرات انفجار روی پل‌های با عرشه‌ی مختلط را مورد تحقیق قرار دادند [21]. آن‌ها یک نمونه پل را در معرض چند سناریوی محتمل انفجار با استفاده از نرم‌افزار ANSYS تحلیل کردند. آن‌ها روشی برای مدل‌سازی انفجار در یک پل با عرشه‌ی کامپوزیت ارائه کردند.

در سال ۲۰۱۰ تانگ و هائو به شبیه‌سازی المان محدود یک پل کابلی در برابر انفجار پرداختند[22]. آن‌ها از نرم‌افزار LS-Dyna برای مدل‌سازی استفاده کردند. مقدار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT را در فواصل ۰/۵ متری از پایه و دکل پل و در فاصله‌ی ۱ متری از عرشه فرض کردند و به تحلیل خرابی پل پرداختند. آن‌هادریافتند که خرابی‌های به‌وجود آمده همگی موضعی بودند ولی با اینحال این خرابی‌های موضعی

ممکن است پایداری کل سازه را بر هم زند و به خرابی کل سازه منجر شود.

در سال ۲۰۱۱ سان و لی عملکرد دکل پل کابلی در برابر انفجار را بررسی کردند [23]. آن‌ها دکل‌های فولادی جعبه‌ای و کامپوزیت را مورد بررسی قرار دادند.آن‌ها از نرم‌افزار المان محدود MD Nastran برای مدل‌سازی استفاده کردند و در نتیجه‌ی تحقیقشان موفق به ارائه‌ی الگوهای خرابی شدند. هم‌چنین مشاهده کردند که در دکل‌های فولادی مورد بررسیشان اثر P-Delta در ناپایداری سازه قابل‌توجه است.

بوداغی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ تحقیقی در مورد کنترل فعال غیرخطی پاسخ دینامیکی تیرهای با مقطع مستطیلی در محیط حرارتی تحت اثر بارگذاری انفجار انجام دادند [24]. سطوح تیرها با دو لایه فیزوالکتریک محصور شدند. معادلات غیرخطی حرکت براساس تئوری برش مرتبه اول و رفتار غیرخطی هندسی ون-کارمن استخراج شدند. روش مربع تفاضلی و نیومارک-بتا برای حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی به‌کار گرفته شد. در این تحقیق، پس از حل معادلات جبری حاصل شده با روش نیوتن-رافسون، تأثیر غیرخطی هندسی، پارامترهای مادی و میدان حرارتی بر روی کنترل ارتعاشی فعال تیرهای مورد نظر تحت اثر انواع بارهای ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفت.

نصر و همکارانش در سال ۲۰۱۳ یک مدل یک درجه آزادی را برای تعیین تأثیر بار محوری روی مقاومت و پایداری ستون تحت اثر انفجار استفاده نمودند [25]. این مدل با مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج آزمایش انفجار ستون‌های فولادی و نتایج حاصل از تحلیل المان محدود مورد تأیید قرار گرفت. سپس منحنی‌های بی‌بعد با لحاظ نمودن اثرات بار انفجار و خصوصیات المان برای پایداری و مقاومت تیر- ستون توسعه داده شد.

کارتا و استوچینو در سال ۲۰۱۳ دو روش برای بررسی تیرهای بتن مسلح تحت اثر بارهای انفجاری ارائه دادند [26]. در روش اول، تیر با استفاده از تئوری اولر-برنولی مدل شد و رفتار الاستوپلاستیک آن با یک رابطه‌ی غیرخطی بین لنگر خمشی و انحنا در نظر گرفته شد. در روش دوم، تیر به‌عنوان یک سازه با یک درجه آزادی مدل شد. اثرات نرخ کرنش تحت انفجار با وارد نمودن ضرایب متغیر زمان در معادلات حرکت استخراج شده در دو روش، لحاظ شد. با مقایسه‌ی نتایج تحقیق با نتایج روش المان محدود و نتایج آزمایشگاهی، نشان داده شد که روش اول دارای دقت بیشتری در تخمین تغییرشکل حداکثر تیر می‌باشد؛ در حالی‌که روش دوم دارای دقت کمتری است ولی به دلیل حجم محاسباتی کمتر، کاربرد آن ساده‌تر می‌باشد.

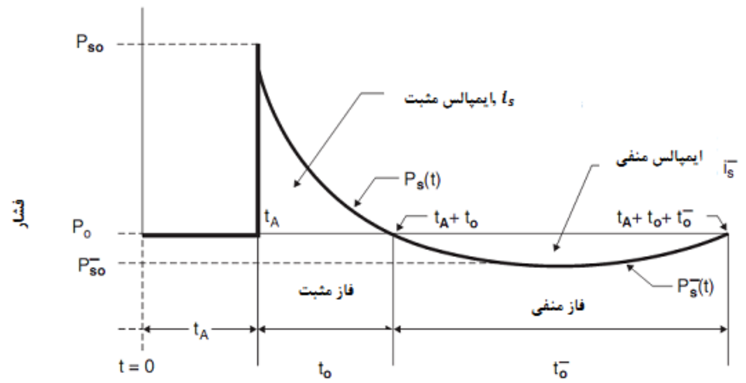
تاکنون عمده‌ی تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی بررسی رفتار سازه، یا طراحی مقاوم آن در برابر انفجار به سازه‌های ساختمانی محدود بوده است و توجه به رفتار پل‌ها در برابر انفجار و یا تحلیل و طراحی مقاوم آن‌ها موضوعی است که در چند سال اخیر توجه برخی محققان را به خود جلب کرده است. در حال حاضر دقیق‌ترین روش تحلیل سازه‌ها در برابر بارگذاری‌های انفجاری، تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌باشد، ولی به‌دلیل پیچیدگی‌های مدل‌سازی، زمان و هزینه‌ی بالا، این روش همواره نمی‌تواند در مقاصد عملی مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه‌ی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که عمده‌ی تحقیقات انجام شده بر روی پل‌ها تحت اثر انفجار براساس نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌ها و حجم محاسبات بالای این تحلیل، در تحقیق حاضر یک روش برای تحلیل استاتیکی غیرخطی پل‌های کامپوزیت با تیر فولادی و دال بتنی تحت اثر انفجار توسعه داده می‌شود. به این منظور ۲٤۰ نمونه پل مختلط با مشخصات هندسی و مشخصات انفجار مختلف مورد بررسی و تحلیل غیرخطی قرار می‌گیرد و براساس نتایج حاصل، طیف‌هایی برای معادل‌سازی اثرات انفجار با بار استاتیکی ارائه می‌گردد که می‌تواند در شبیه‌سازی پل‌ها در برابر انفجار مورد استفاده قرار گیرد.

مدل‌سازی انفجار

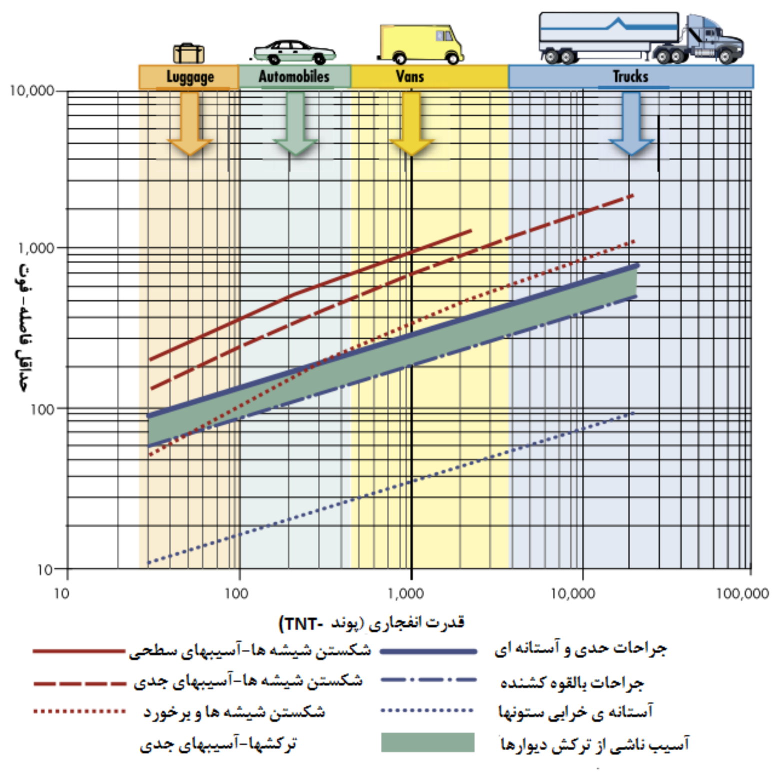
به‌طور کلی بارگذاری ناشی انفجار به‌صورت شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود [7].

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، پس از وقوع انفجار، در زمان بسیار کوتاهی فشار اتمسفر P_o به فشار P_{so} می‌رسد و بعد از آن فشار کاهش می‌یابد و وارد فاز منفی یا مکش می‌شود. نحوه‌ی به‌دست آوردن نمودار فوق به تفصیل در مرجع [2] بیان شده است.

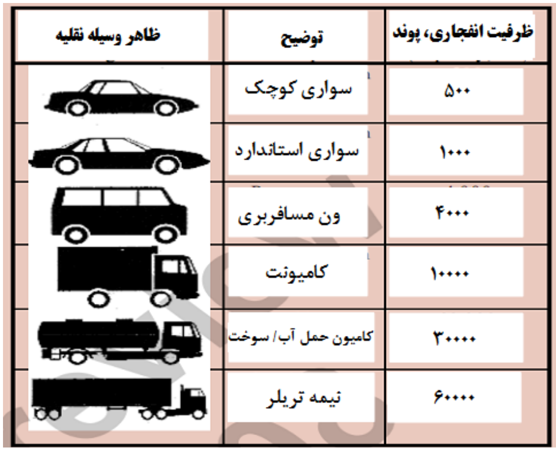
برای پیش‌بینی شدت انفجار احتمالی می‌توان از اشکال (۲)، (۳) وجدول (۱) استفاده کرد. همان‌گونه که از جدول (۱) مشخص است، انفجاری که بیشترین احتمال وقوع را دارد مربوط به انفجار ۵۰۰ پوند TNT است.انتخاب مقدار ماده منفجره در طرح‌ها تابعی از ملاحظات اقتصادی، اهمیت سازه و مباحث احتمالاتی می‌باشد.



شکل ۱ بارگذاری انفجار



شکل ۲ پیش‌بینی قدرت انفجارهای محتمل، [9,11]



ظرفیت انفجاری، پوند	توضیح	ظاهر وسیله نقلیه
۵۰۰	سواری کوچک	
۱۰۰۰	سواری استاندارد	
۴۰۰۰	ون مسافربری	
۱۰۰۰۰	کامیونت	
۳۰۰۰۰	کامیون حمل آب/ سوخت	
۶۰۰۰۰	نیمه تریلر	

شکل ۳ حداکثر ظرفیت حمل مواد منفجره توسط خودروها، نشریه‌ی دستورالعمل‌های امنیت در پل‌ها[15]

جدول ۱ انواع تهدیدات در پل‌ها و تونل‌ها به‌همراه حداکثر احتمال وقوع، کمیته‌ی روبان آبی در امنیت پل‌ها و تونل‌ها[27]

نوع تهدید	حداکثر محتمل	بیشترین احتمال وقوع
انفجارهای متعارف	کامیون : ۲۰۰۰۰ پوند کشتی : ٤۰۰۰۰ پوند	بمب خودرو : ۵۰۰ پوند
تصادف با سازه	کامیون: ۱۰۰۰۰۰ پوند کشتی : بستگی به نوع آبراه دارد	کامیون : H-15 کشتی : بخش برخورد کشتی در آیین‌نامه‌ی آشتو LRFD را نگاه کنید
آتش	بزرگترین مخزن سوخت موجود بزرگترین کشتی یا تانکر سوخت موجود	کامیون گازوئیل(3S-2) کشتی سوخت
شیمیایی/بیولوژیکی HAZMAT	این تهدیدات وجود دارند. با این حال، این کمیته صلاحیت لازم برای ارزیابی آنها را ندارد. بنابراین، متخصصان دیگر باید این تهدیدات را در این راستا ارزیابی کنند	

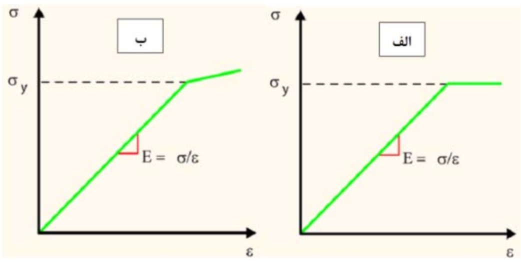
مدل‌سازی پل

در تحقیق حاضر مدل‌سازی پل با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام می‌شود. در این‌جا منظور از مدل‌سازی، مدل‌سازی عرشه می‌باشد. برای مدل‌سازی عرشه می‌توان از چند مدل‌سازی متنوع بسته به هدف تحقیق استفاده کرد. به‌عنوان مثال می‌توان برای تیرها و دال از المان‌های پیوسته SOLID استفاده کرد. مزیت این مدل این است که دقت آن بالاست و می‌توان برای بال‌ها و جان از مشخصات مختلف مصالح استفاده کرد. از عیوب این مدل، نیاز به زمان بیشتر برای مدل‌سازی به‌دلیل هندسه‌ی پیچیده‌تر و نیاز به زمان پردازش بالاست. مدل دیگری که برای مدل‌سازی عرشه می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، استفاده از المان‌های SHELL برای عرشه وBEAM برای تیرهاست. مزیت این مدل، سهولت بیشتر مدل‌سازی به‌دلیل عدم نیاز به مدل‌سازی پروفیل تیر توسط کاربر و در نتیجه نیاز به زمان مدل‌سازی کمترو زمان پردازش کمتر است. علی‌رغم ساده بودن این مدل نشان داده شده است که این مدل برای تحلیل‌های خطی و غیرخطی از دقت بسیار خوبی برخوردار است [28]. هم‌چنین می توان از ترکیبی از دو مدل‌سازی فوق استفاده کرد. برای شبیه‌سازی عملکرد کامپوزیت بین دال و تیر باید این دو عنصر را به طریق صحیحی به هم مقید نمود. در نرم‌افزار ABAQUS این کار با استفاده از

قیــدهای(MPC(Multi Point Constraints صــورت می‌گیرد.

در این تحقیق دال توسط المان‌های S4RShell بـا پنج نقطه انتگرال‌گیری در طـول ضـخامت مـدل شـده است. این المان، یک المـان چهـارگرهی کـاهش یافتـه می‌باشد و در هر گره دارای شش درجه آزادی است که برای مدل کردن تغییر شـکل‌هـای بـزرگ و غیرخطـی مناسب است. مزیت استفاده از این المان کـاهش زمـان پردازش تحلیل نسبت به المان‌هـای آجـری سـه‌بعـدی می‌باشد. تیرها توسط المان‌های سه‌گرهـی تیـر فضـایی تیموشنکو B32 مدل شـده‌انـد. اتصـال بـین دال و تیـر توسط قیدهای MPC از نوع قیدهای صلب ایجاد شـده است. در نرم‌افزار آباکوس برای تعریـف میلگردهـا دو روش اصــلی وجــود دارد. روش اول مــدل‌ســازی میلگردها و دال به‌صورت سه‌بعدی و گنجاندن میلگـرد در بتن به‌صورت مدفون با اسـتفاده از قابلیـت تعریـف عناصر مـدفون در نـرم‌افـزار و روش دوم مـدل‌سـازی Shell اســت. در روش دوم نیــازی بــه مــدل‌ســازی میلگردها نیست و با استفاده از قابلیت نـرم‌افـزار بـرای المان‌های Shell فقط کافی است که مختصـات لایـه‌ی آرمـاتور، سـطح مقطـع میلگـرد و فاصـله‌ی آن‌هـا از یکـدیگر بـه نـرم‌افـزار معرفـی شـود. در ایـن تحقیـق میلگردها به این صورت مدل‌سازی شده‌اند.

در این پژوهش برای بـتن از مـدل آسـیب دیـده خمیری یا CDP استفاده شـده اسـت. ایـن مـدل بـرای تحلیل‌هـای دینـامیکی، اسـتاتیکی، خطـی و غیرخطـی مناسب می‌باشد و می‌تواند خرابی بتن را نیز مـدل کنـد [29]. در نرم‌افزار آباکوس امکان تعریف مدل شکسـت برای فولاد نیز وجود دارد. مدل‌هـای شکسـت فلـزات موجـود در نـرم‌افـزار عبارتنـد از مـدل شکسـت نـرم، شکســت برشــی، مــدل جانســون کــوک، مــدل FLD، FLSD وM-K. به‌دلیل پیچیدگی مدل‌سازی شکست و هم‌چنین چند برابر شدن زمـان و حجـم محاسـبات در مدل‌سازی شکست، در تحقیق حاضـر شکسـت فـولاد مدل نشده است و تنها رفتـار الاسـتو پلاسـتیک بـرای فولاد فرض شده است. برای رفتـار پلاسـتیک، در ایـن نرم‌افزار مدل‌های گونـاگونی از جملـه مـدل پلاسـتیک کلاسیک، موهر کلمپ، دراکر- پراگـر و... وجـود دارد. در تحقیق حاضـر از مـدل پلاسـتیک کلاسـیک کـه در نرم‌افـزار بـه‌اختصـار بـا عنـوان پلاسـتیک وجـود دارد استفاده شده است.مدل پلاسـتیک کلاسـیک از سـطوح تسلیم فون مایزز استفاده می‌کند و برای تعریـف رفتـار پلاستیک ایده‌آل یا رفتـار پلاسـتیک بـا سـخت‌شـدگی ایزوتروپیک مناسب است [28]. مطالعات تجربی نشـان داده است که فـرض سـطح تسـلیم فـون مـایزز بـرای فلزات از دقت مناسبی برخوردار اسـت. بـرای تعریـف سخت‌شدگی امکان تعریف سخت شـدگی‌هـایی نظیـر ایزوتروپیک، سینماتیک و جانسون- کوک وجـود دارد. طبق تحقیقات چونگ و سوتلینو برای مدل کردن فولاد می‌توان از مدل الاستوپلاستیک ایده‌آل یا نمـودار دقیـق تنش کرنش فولاد استفاده کرد [29]. در همین راستا در این تحقیق برای میلگردها از مدل الاسـتیک-پلاسـتیک ایده‌آل (بدون سخت‌شدگی) و برای شـاهتیرها از مـدل دوخطـی بـا در نظـر گـرفتن سـخت‌شـدگی خطـی ایزوتروپیـک اسـتفاده شـده اسـت.در شـکل (٤) مـدل الاسـتو پلاسـتیک دوخطـی مـورد اسـتفاده در تحقیـق حاضر نشان داده شده است.



شکل ٤الف) مدل الاستوپلاستیک فرض شده برای میلگردها (بدون سخت‌شدگی) ، ب) مدل الاستوپلاستیک فرض شده برای شاه‌تیرها (با سخت‌شدگی خطی)

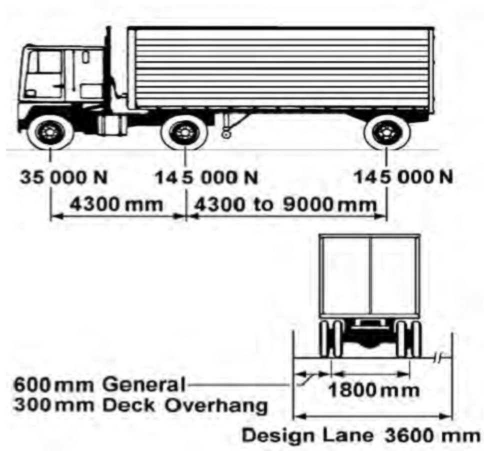
در تحقیـق حاضـر انفجـار بـا اسـتفاده از مـاژول CONWEP نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی شد. CONWEP انفجـار را بـا اسـتفاده از مکانیـک سـیالات محاسـباتی CFD (Computational Fluid Dynamics) مـدل مـی-

کند. در این ماژول که در نرم‌افزار آباکوس وجود دارد، مقدار جرم مـاده‌ی منفجـره برحسـب TNT معـادل، و سطحی از جسم که موج انفجار با آن اندرکنش دارد به نرم‌افزار معرفی می‌شود. سپس فشار مؤثر وارد بر سازه توسط نـرم‌افـزار آبـاکوس بـه‌صـورت بسیار دقیـق و خودکار محاسبه می‌شود و بر سازه اثر می‌کند.

صحت‌سنجی نتایج نرم‌افزار

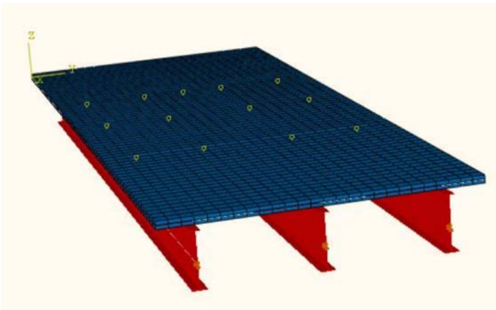
از آن‌جایی که کلیه‌ی تحلیل‌ها در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است، در این بخـش برای اطمینان از صحت نتایج نرم‌افـزار مـورد اسـتفاده، یک پل با عرشه‌ی مختلط مـدل‌سـازی شـده و تحلیـل غیرخطی روی آن انجام شده است. مدل آزمایشـگاهی این پل توسط کاتول و همکاران[30]در سـال ۱۹۹۵ در دانشگاه نبراسـکا سـاخته شـد و مـورد آزمـایش قـرار گرفت. پـل یـک دهانـه‌ی سـاده متشـکل از ۳ شـاهتیر فولادی می‌باشد که برای دو خط عبور وسـیله‌ی نقلیـه طراحی شده است. طول پل برابر ۲۱/٤ متر، عـرض آن ۷/۹ متر می‌باشد. عمق شاهتیرها ۱/۳۷ متر و فاصلـه ی شاهتیرها از یکدیگر برابر ۳/۰۵ متر است. عـرض بـال فوقـانی و بـال تحتـانی بـه‌ترتیـب ۲۲/۸٦ و ۳۵/٥٦ سانتی‌متر و ضخامت بال فوقانی، بـال تحتـانی و جـان به‌ترتیب ۱/۹۰۵، ۳/۱۷۵، ۰/۹۵۳ سـانتی‌متـر مـی‌باشـد. هـم‌چنـین مشخصـات مصـالح مطـابق بـا جـدول (۲) می‌باشد.

در مدل آزمایشگاهی، قـرار گـرفتن هـم‌زمـان دو کامیون طراحـی HS-20آشـتو در وسـط دهانـه توسـط اعمال نیرو به کابل‌هایی که بـه محـل اثـر فرضـی بـار چرخ‌های کامیون متصل بوده‌اند، شبیه‌سازی شده بودند. نیروی وارد به کابل‌ها کم‌کم آنقدر افزایش مـی‌یابـد تـا کل پل در اثر رخ دادن مکـانیزم در شـاهتیرها ناپایـدار شود و فرو بریزد. هدف از این آزمایش بررسـی رفتـار خطی و غیرخطی پل مورد نظر بـوده اسـت. در شـکل (٥)، مشخصات کامیون HS-20آشتو آورده شده است.

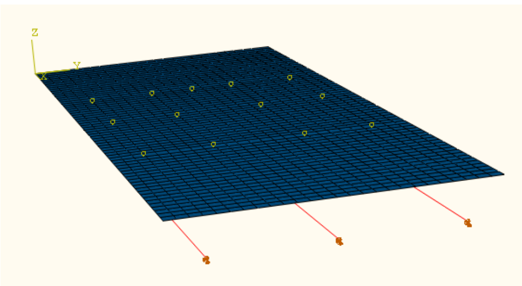


شکل ٥مشخصات کامیون HS-20 آشتو
(AASHTO LRFD Bridge Specifications)

در شکل (٦) مدل ایجـاد شـده توسـط نـرم‌افـزار آباکوس برای پل مورد بررسی نشـان داده شـده اسـت. پس از مدل‌سـازی و تحلیـل نمونـه توسـط نـرم‌افـزار آباکوس، نتایج با نتایج آزمایشگاهی و همچـنین نتـایج چونگ و سوتلینو [29] مقایسه گردید. ایـن مقایسـه در شکل (۷) نشان داده شده است.

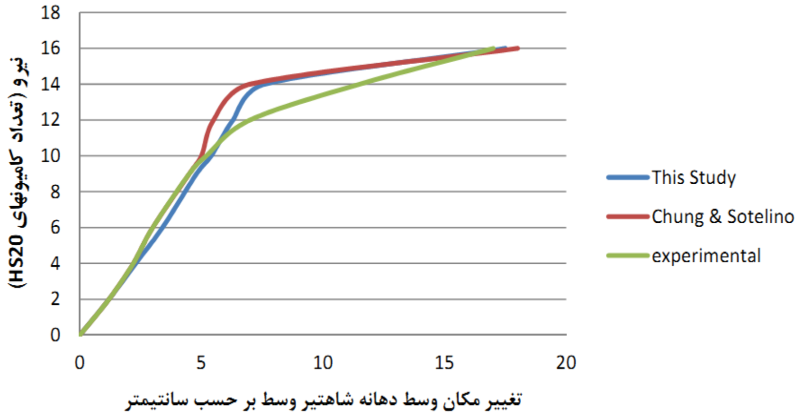


(الف)



(ب)

شکل ٦الف) مدل رندر شده‌ی گرافیکی، ب) مدل المان محدود ایجاد شده با استفاده از المان‌های Beam و Shell در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۷ مقایسه‌ی نتایج تحلیل غیرخطی پل نبراسکا

همان‌گونه که در شکل (۷) ملاحظه می‌گردد نتایج تحلیل نشان از انطباق بالای مدل ایجاد شده در تحقیق حاضر با نتایج چونگ و سوتلینو و هم‌چنین نتایج آزمایشگاهی دارد.

روش پیشنهادی تحقیق

در روش پیشنهادی تحقیق برای برآورد پاسخ‌های حداکثر پل در برابر انفجار، یک روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مناسب،به‌دلیل پیچیدگی‌ها و وقت‌گیر بودن آن و هم‌چنین مشکلات مربوط به تفسیر نتایج آن جایگزین روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، می‌گردد. به این منظور ابتدا تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی تعداد زیادی نمونه‌ی پل با مشخصات هندسی مختلف، تحت اثر مشخصات انفجار مختلف انجام می‌شود و نتایج مربوط به پاسخ‌های غیرخطی پل‌ها استخراج می‌گردند. سپس براساس مقادیر تغییرمکان‌های حداکثر حاصل از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی نمونه‌ها، تحلیل استاتیکی غیرخطی با روش کنترل تغییرمکان بر روی کلیه‌ی نمونه‌ها انجام می‌شود به‌طوری‌که تغییرمکان حداکثر حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی بر روی یک نمونه پل مشخص با تغییرمکان حداکثر حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی همان پل‌ها یکسان باشد. به این ترتیب مقدار بار استاتیکی معادل برای اثرات انفجار برای هر نمونه پل به‌دست می‌آید. پس از محاسبه‌ی بار استاتیکی معادل برای همه‌ی نمونه‌ها، چند طیف بارگذاری استاتیکی بر حسب دوره‌ی تناوب پل‌ها، استخراج و ارائه می‌گردد که می‌تواند به‌سادگی برای معادل‌سازی اثرات انفجار با یک سطح خطر مشخص، با بار استاتیکی معادل به‌منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی به‌جای تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی پل، به‌کار رود. در ادامه مشخصات نمونه‌ها و جزئیات تحلیل‌های غیرخطی تشریح می‌گردد.

مشخصات نمونه‌های مورد بررسی

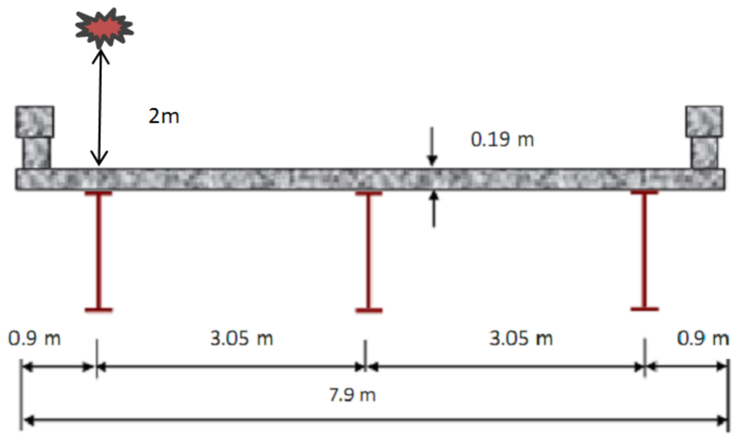
برای تهیه‌ی طیف‌های بارگذاری استاتیکی معادل اثرات انفجار،۲٤۰ نمونه پل در این پژوهش مورد تحلیل قرار گرفتند. نمونه‌های پل از روی پل نبراسکا توسعه داده شدند. کلیه‌پل‌هادو سر مفصل و دارای ۳ شاهتیر هستند. عرض تمام پل‌ها مطابق با پل نبراسکا برابر ۷/۹ متر است. مشخصات این پل در بخش قبل ذکر گردید. از آن‌جا که وسط دهانه‌ی واقع بر یکی از شاهتیرهای کناری نقطه‌ای بحرانی است، این نقطه به‌عنوان محل انفجار برای تحلیل‌های دینامیکی فرض شد. هم‌چنین محل انفجار در ارتفاع ۲ متری از سطح دال قرار گرفت. مقطع عرضی کلیه‌ی نمونه‌ها و محل انفجار در

تحلیل دینامیکی در شکل (۸) نشان داده شده است. از آن‌جایی که طیف‌های ارائه شده در این پژوهش به‌صورت تابعی از پریود طبیعی ارائه شده‌اند، برای دست‌یابی به پریودهای مختلف ٤ طول مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۱/٤ و ۲۵ متر برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد. برای هر طول پل، ۲۰ مقطع متفاوت برای شاهتیرها در نظر گرفته شده است. این تفاوت مقاطع مربوط به مقادیر عمق شاهتیرها، ضخامت بال، عرض بال‌ها و ضخامت جان می‌باشد. علت انتخاب تعداد زیاد نمونه‌ها افزایش دقت طیف پیشنهادی و حذف خطاهای احتمالی در مدل‌سازی و تحلیل می‌باشد.

مشخصات مصالح برای تمامی نمونه‌ها مطابق با جدول (۲) در نظر گرفته شده‌اند.

مدل‌سازی انفجار

برای در نظر گرفتن قدرت انفجارهای محتمل و سطوح خطر، با مراجعه به تحقیقات قبلی واشکال (۲)، (۳) و جدول (۱)، سه مقدار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT در نظر گرفته شده‌اند. برای در نظر گرفتن محل وقوع انفجار از آن‌جایی که از لحاظ تغییرشکل، بحرانی‌ترین محل برای انفجار در وسط دهانه و روی یکی از شاهتیرهای کناری است، منبع انفجار برای کلیه‌ی نمونه‌ها در وسط دهانه‌ی پل، روی یکی از شاهتیرهای کناری و در ارتفاع ۲ متری فرض شده است. ارتفاع ۲ متری باتوجه به خصوصیات اتوموبیل‌ها و مراجعه به تحقیقات مرتبط فرض شده است.



شکل ۸ مقطع عرضی پل‌ها و محل انفجار در تحلیل دینامیکی

جدول ۲مشخصات مکانیکی مصالح در نمونه‌های مورد بررسی

	دال	شاهتیر	میلگرد
مدول یانگ GPa	۲۷/۸	۱۸۰	۱۹۰
تنش تسلیم MPa	–	۲۷۰	۵۰۰
تنش نهایی Mpa	–	٤۱۰	۵۰۰
مقاومت فشاری Mpa	٤۵	–	–

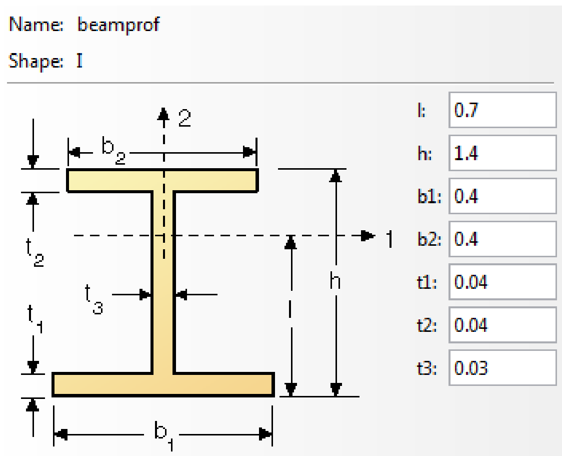
تحلیل غیرخطی نمونه‌ها

پس از مدل‌سازی نمونه‌ها و اعمال سه سطح خطر انفجار بر روی هر نمونه، تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی کلیه‌ی نمونه‌ها انجام شد و نتایج مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی، استاتیکی غیرخطی و تحلیل فرکانس برای هر نمونه استخراج گردید. هم‌چنین با فرض الگوی بارگذاری مستطیلی بر روی کلیه‌ی نمونه‌ها، تحلیل غیرخطی استاتیکی با روش کنترل تغییرمکان انجام شد و مقادیر بار معادل استاتیکی محاسبه گردید.

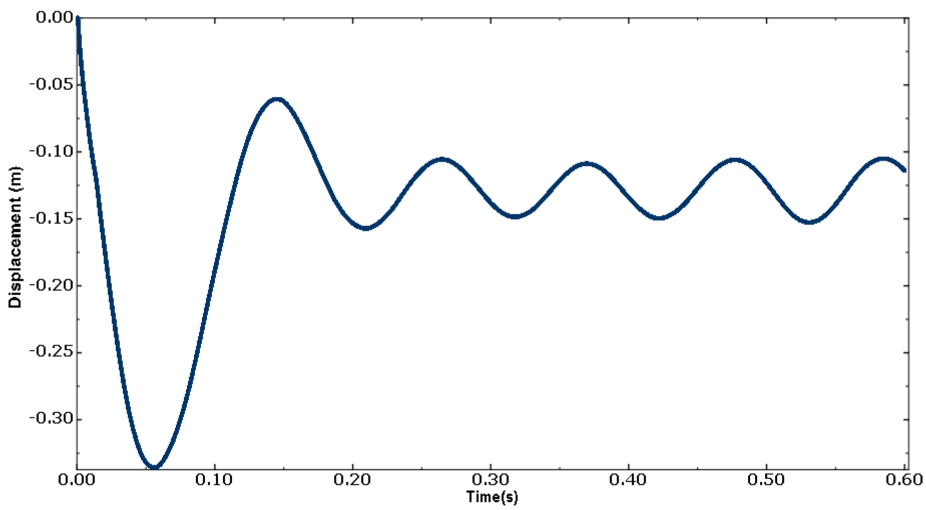
به‌عنوان نمونه نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی برای یک نمونه از پل‌ها که مشخصات هندسی آن مطابق شکل (۹) می‌باشد(ابعاد بر حسب متر هستند) ارائه می‌شود.

این نمونه تحت انفجار ۵۰۰ پوند TNT تحلیل شده است. سایر مشخصات پل مطابق با پل نبراسکا انتخاب شده است.

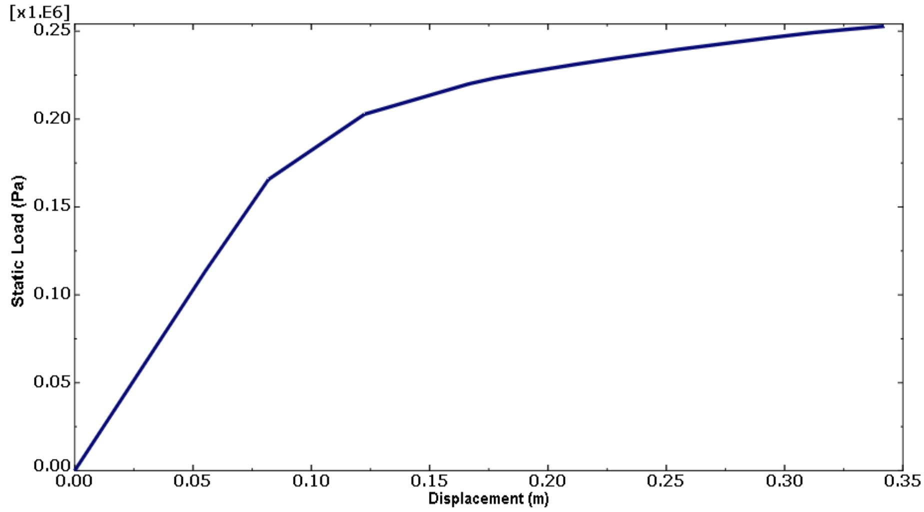
تغییرات تغییرشکل وسط دهانه‌ی شاه تیر کناری در اثر انفجار ۵۰۰ پوند TNT روی عرشه برحسب زمان که از تحلیل دینامیکی غیرخطی حاصل شده است، در طول یک ثانیه در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۹ مشخصات هندسی سطح مقطع شاهتیرها در نمونه‌ی اول



شکل ۱۰تغییرات تغییرشکل وسط دهانه‌ی شاهتیر کناری نمونه‌ی مورد بررسی در اثر انفجار ۵۰۰ پوند TNT روی عرشه



شکل ۱۱ تغییرات بار استاتیکی نمونه مورد بررسی تحت اثر انفجار ۵۰۰ پوند TNT روی عرشه

شکل (۱۱) تغییرات بار استاتیکی را برحسب تغییرشکل حداکثر شاه تیر که از تحلیل استاتیکی غیرخطی با کنترل تغییرمکان برای همان نمونه‌ی شکل (۹) تحت اثر ۵۰۰ پوند TNT حاصل شده است نشان می‌دهد. در این شکل محور عمودی نشان دهنده‌ی بار گسترده‌ی استاتیکی وارد بر عرشه است و محور افقی تغییرمکان وسط دهانه‌ی شاه تیر کناری را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۰)، در این حالت تغییرشکل ماکزیمم در شاهتیر کناری که منبع انفجار درست بالای آن قرار دارد، برابر با ۳۳ سانتی‌متر شده است. برای این نمونه تحلیل استاتیکی غیرخطی با کنترل تغییرمکان انجام شده است تا بار معادل محاسبه شود. توزیع بار استاتیکی به‌صورت گسترده و یکنواخت به سرتاسر عرشه اعمال می‌شود و بار به‌آهستگی افزایش می‌یابد تا تغییرمکان نقطه‌ی کنترل (وسط دهانه‌ی شاهتیر کناری) به مقدار ۳۳ سانتی‌متر برسد. پس از رسیدن تغییرمکان نقطه‌ی کنترل به تغییرمکان مورد نظر، بارگذاری متوقف می‌شود و بار به‌دست آمده به‌عنوان بار معادل استاتیکی غیرخطی برای نمونه‌ی مورد نظر ثبت می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد، بار استاتیکی معادل برای این نمونه، در اثر انفجار حاصل از ۵۰۰ پوند TNT در وسط دهانه برابر با ۲۵۰ کیلو پاسکال می‌باشد. به همین ترتیب نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی و استاتیکی غیرخطی با روش کنترل تغییرمکان برای سایر نمونه‌های مورد بررسی استخراج گردیده است.

تعیین رابطه‌ی بار استاتیکی معادل

به‌منظور تعیین بار استاتیکی معادل، برای کلیه‌ی نمونه‌ها ابتدا تحلیل دینامیکی غیرخطی صورت گرفت و تغییرمکان حداکثر به‌دست آمد، سپس تحلیل استاتیکی غیرخطی با کنترل تغییرمکان انجام شد و باری که همان تغییرمکان حداکثر حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی را ایجاد می‌کرد به‌عنوان بار استاتیکی در نظر گرفته شد. برای ارائه‌ی رسم طیف بارگذاری استاتیکی، رابطه‌ی بین بار معادل استاتیکی و پریود طبیعی ارتعاش یکی از شاهتیرها حول محور قوی تعیین گردید. دلیل استفاده از پریود شاهتیر به‌جای پریود کل عرشه این است که در مقاصد عملی نیاز به مدل‌سازی عرشه برای محاسبه‌ی پریود نباشد و بتوان بار معادل را تنها با محاسبه‌ی پریود یکی از شاهتیرها محاسبه کرد. پس از انجام تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی، برای هر نمونه یک نقطه به‌دست آمده است که دارای یک مقدار بار استاتیکی و یک مقدار پریود

طبیعی می‌باشد. نهایتاً با برازش تابعی توانی از میان کلیه‌ی نقاط با روش خطای کمترین مجذور مربعات، طیف‌ها برای ۳ سطح خطر انفجار به‌صورت نمودارهای اشکال (۱۲) تا (١٤) ارائه شده‌اند. این طیف‌ها رابطه‌ی بار استاتیکی معادل و دوره‌ی تناوب سازه را در سه حالت مختلف بارگذاری انفجار نشان می‌دهند. برای سایر حالات بارگذاری می‌توان از درون‌یابی استفاده نمود. لازم به ذکر است که الگوی بارگذاری استاتیکی در این تحقیق به‌صورت مستطیلی گسترده بر روی تمام عرشه اعمال شده است. دلیل استفاده از الگوی مستطیلی سهولت به‌کارگیری آن می‌باشد. به هر حال، الگوی مستطیلی استاتیکی، با الگوی واقعی بارگذاری دینامیکی متفاوت می‌باشد و بدون شک دقیق‌ترین الگوی بارگذاری نیست.

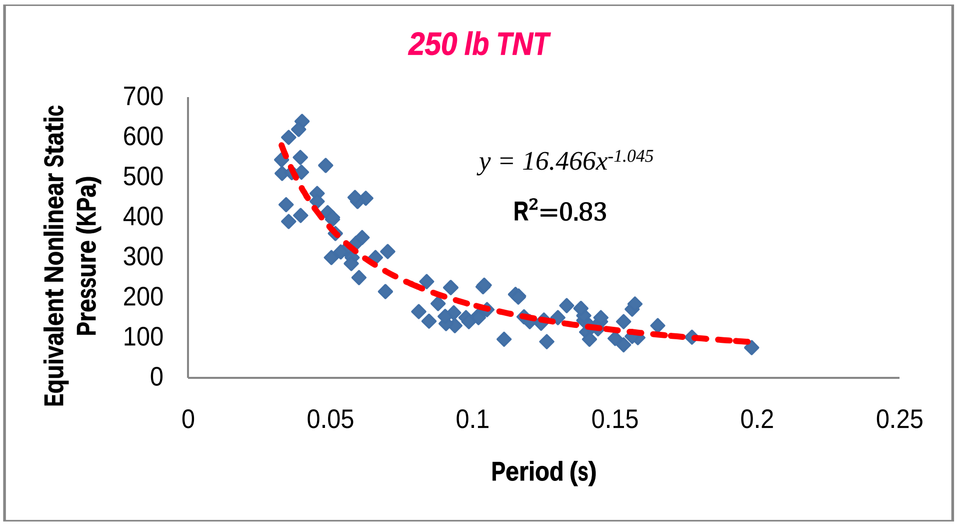
همان‌گونه که در اشکال (۱۲) تا (١٤) ملاحظه می‌گردد، مربع خطاها در طیف‌های به‌دست آمده بین ۰/۸۲ تا ۰/۹۵ قرار دارد که نشان دهنده‌ی دقت مناسب طیف‌های به‌دست آمده است. با توجه به طیف‌های به‌دست آمده مشهود است که با کم شدن دوره‌ی تناوب ارتعاش عرشه، بار معادل استاتیکی افزایش می‌یابد. برای استفاده از طیف‌های ارائه شده کافی است، با در دست داشتن دوره‌ی تناوب طبیعی یکی از شاهتیرها، بار استاتیکی از روی نمودارهای مربوط استخراج گردد و به‌صورت گسترده به روی عرشه اعمال گردد و تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام شود. به این ترتیب سه رابطه‌ی زیر برای تعیین بار معادل استاتیکی در سطوح مختلف انفجار پیشنهاد می‌گردد:

$$P_s = 16.466\ T^{-1.045} \qquad (۱)$$

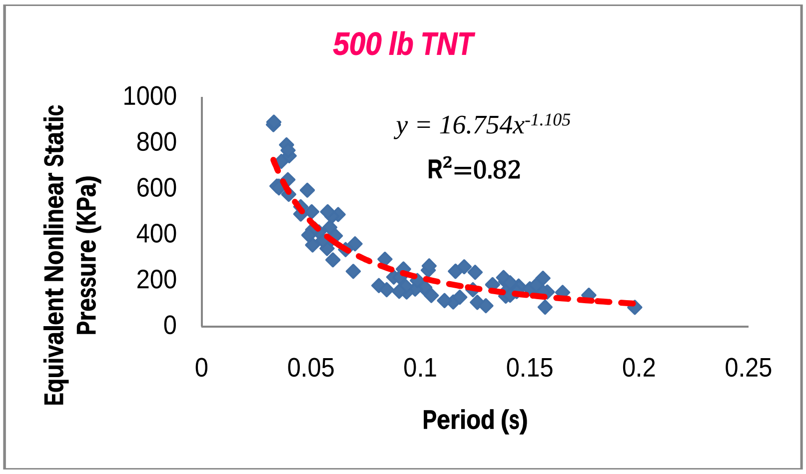
$$P_s = 16.754\ T^{-1.105} \qquad (۲)$$

$$P_s = 23.936\ T^{-1.185} \qquad (۳)$$

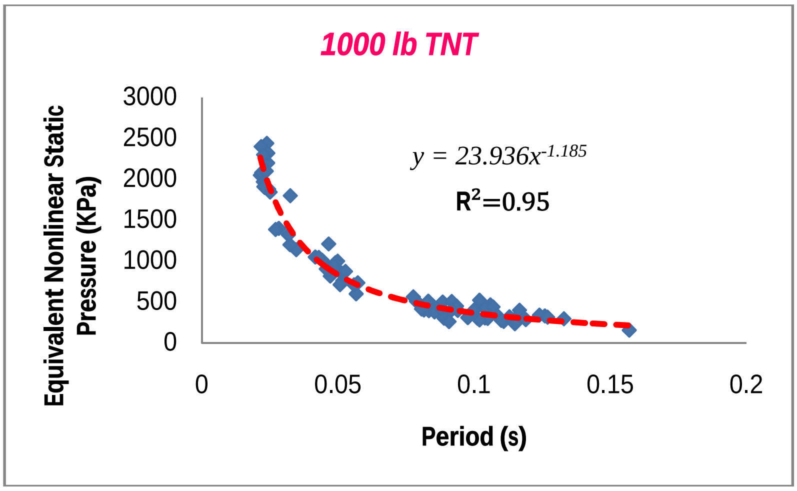
که در این روابط، Ps بار معادل استاتیکی برحسب کیلو پاسکال و T دوره‌ی تناوب شاهتیر برحسب ثانیه می‌باشد. معادلات (۱)، (۲) و (۳) برای تعیین بار معادل استاتیکی گسترده‌ی یکنواخت بر روی عرشه به‌ترتیب برای انفجار حاصل از ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT به‌کار می‌روند.شایان ذکر است که با توجه به این‌که تحلیل‌های انجام شده براساس فرضیات و محدودیت‌هایی هم‌چون محدودیت ابعاد، شرایط تکیه‌گاهی و مشخصات مکانیکی مصالح و هم‌چنین فرض توزیع مستطیلی یکنواخت بار معادل استاتیکی قرار دارد، روابط ارائه شده تقریبی می‌باشند وتنها برای برآورد تقریبی بار انفجار به‌صورت استاتیکی و براساس الگوی مستطیلی مفروض ارائه شده‌اند.



شکل ۱۲ طیف بار معادل استاتیکی برای انفجار حاصل از ۲۵۰ پوند TNT



شکل ۱۳ طیف بار معادل استاتیکی برای انفجار حاصل از ۵۰۰ پوند TNT



شکل ۱٤ طیف بار معادل استاتیکی غیرخطی ارائه شده برای انفجار حاصل از ۱۰۰۰ پوند TNT

صحت‌سنجی روش پیشنهادی

در این بخش برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی چند مثال بررسی شده است. ۸ مثال با مشخصات مختلف انجام شده است. مشخصات مصالح در این مثال‌ها و هم‌چنین ضخامت و مشخصات دال بتنی، همانند پل نبراسکا می‌باشد. سایر مشخصات مطابق جدول (۳) انتخاب شده است. هم‌چنین، خلاصه‌ی نتایج تحلیل‌های انجام شده برای این مثال‌ها در جدول (٤) نشان داده شده است. براساس روش پیشنهادی تحقیق ابتدا مقدار بار معادل استاتیکی با استفاده از روابط (۱)، (۲) و (۳) برای نمونه‌ها براساس سطح خطر در نظر گرفته شده برای آن‌ها محاسبه گردید. سپس با اعمال آن به‌صورت الگوی بارگذاری مستطیلی بر روی هر نمونه، تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام شد و تغییرمکان حداکثر حاصل از آن محاسبه گردید. به‌منظور ارزیابی دقت نتایج حاصل از روش پیشنهادی، تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت اثر مدل واقعی انفجار بر روی نمونه‌های مورد بررسی انجام شد و نتایج حاصل از آن با نتایج روش پیشنهادی مقایسه گردید. به‌عنوان نمونه تغییرمکان حداکثر حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی و روش پیشنهادی برای مثال (۱) در شکل‌های (۱۵) و (۱٦) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج حاصل مطابق جدول (٤) درصد اختلاف تغییرشکل استاتیکی غیرخطی نسبت به

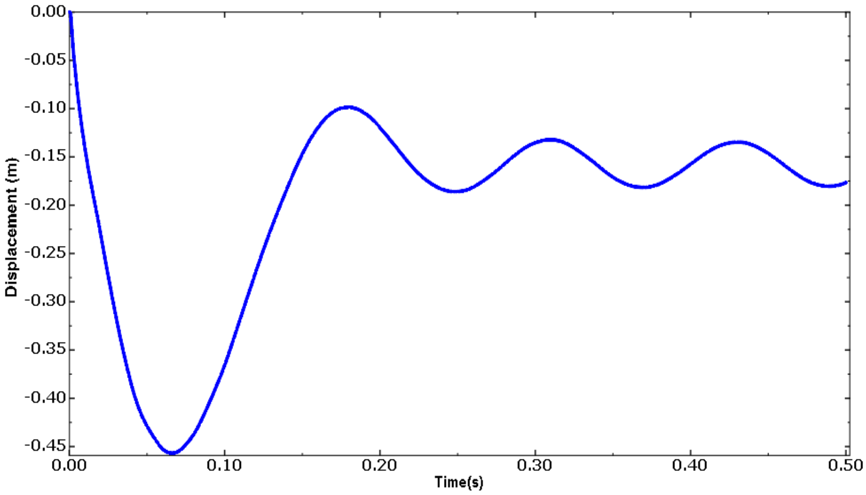
تغییرشکل دینامیکی غیرخطی بین ۲.۲ تا ۴۵ درصد قرار دارد. بیشترین خطا مربوط به مثال (٦) و کمترین خطا مربوط به مثال (۱) می‌باشد.

جدول ۳ مشخصات هندسی شاهتیرها در مثال‌های مورد بررسی

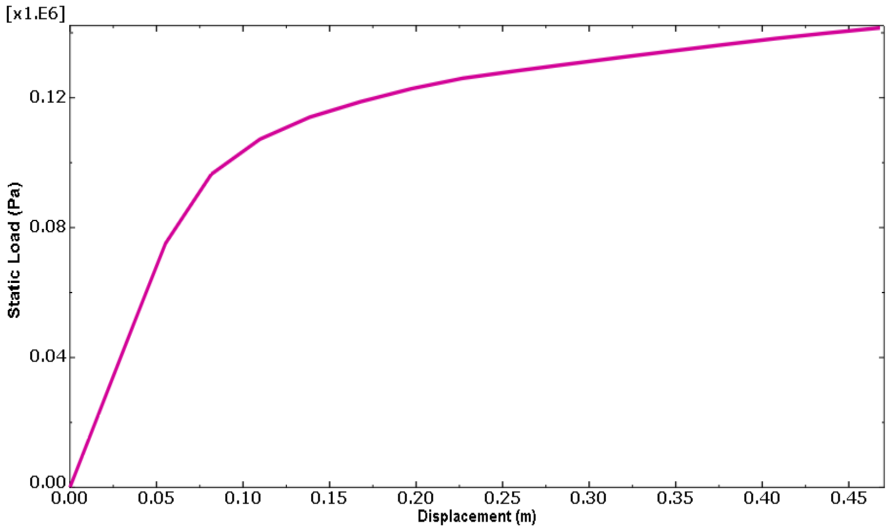
Example N.O	t_w (cm)	t_f (cm)	b_f(cm)	h(cm)	L(m)	TNT mass(lb)
1	2	2	40	110	21.4	500
2	3	2	20	50	10	250
3	3	2	30	100	15	250
4	3	2	35	120	15	250
5	3	2	60	140	25	250
6	5	3	80	220	21.4	1000
7	5	3	100	200	25	1000
8	5	2	80	200	18	1000

جدول ٤ خلاصه‌ی نتایج تحلیل برای مثال‌های مورد بررسی

شماره مثال	مقدار ماده منفجره (پوند)	دوره تناوب (s)	بار معادل استاتیکی (kpa)	تغییر مکان حداکثر دینامیکی(سانتی‌متر)	تغییر مکان حداکثر استاتیکی(سانتی‌متر)	درصد خطا
1	500	0.146	140.4	-45	-46	2.2
2	250	0.0398	478.3	-6	-4	33
3	250	0.086	213.8	-11	-12	9
4	250	0.0724	256	-10	-7	30
5	250	0.161	111	-17.5	-13	25
6	1000	0.0803	475	-33	-18	45
7	1000	0.114	313.8	-37.5	-39	4
8	1000	0.065	610	-42	-36	14



شکل ۱۵ تغییرات تغییرشکل وسط دهانه‌ی شاهتیر کناری برای مثال (۱)



شکل ١٦ برآورد تغییرشکل حداکثر با استفاده از روابط پیشنهادی برای مثال (١)

با توجه به پیچیدگی رفتار پل در برابر انفجار، به‌طور دقیق نمی‌توان قضاوت نمود که مقدار خطا در چه مواقعی افزایش می‌یابد. به هر حال روش پیشنهادی یک روش کاربردی و ساده در اختیار طراح قرار می‌دهد تا بتواند تغییرمکان حداکثر یک پل را تحت اثر انفجار بدون نیاز به تحلیل‌های پیچیده دینامیکی غیرخطی و مدل‌سازی دقیق انفجار برآورد نماید.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر یک روش ساده و کاربردیبرای معادل‌سازی بارگذاری انفجار بر روی پل‌هایی با عرشه‌ی مختلط پیشنهاد گردید. معادله‌ها و منحنی‌های ارائه شده در تحقیق، به‌سادگی توانایی تخمین بار معادل استاتیکی انفجار را بر روی پل‌هایی با عرشه‌ی مختلط دارند و بار معادل استاتیکی با معلوم بودن تنها دوره‌ی تناوب پل، قابل محاسبه می‌باشد.

نشان داده شد که در صورت استفاده از طیف‌های پیشنهادی تحقیق که براساس الگوی مستطیلی بارگذاری استاتیکی استخراج شده‌اند،می‌توان به نتایج محافظه‌کارانه‌ای برای تخمین تغییرشکل غیرخطی پل‌ها، بدون استفاده از تحلیل‌های پیچیده‌ی دینامکی غیرخطی و مدل‌سازی واقعی انفجار، دست یافت. هرچند گاهی اوقات استفاده از این طیف‌ها می‌تواند منجر به طرح‌های غیراقتصادی گردد. به هرحال، اگرچه الگوی مستطیلی دقت بالایی ندارد، اما نسبت به سایر الگوهای بارگذاری استاتیکی، بسیار ساده‌تر و سریع‌تر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.
از آن‌جایی که تحیقات در این زمینه بسیار نوپاست، می‌بایست اثر تغییر در سایر مشخصات پل هم‌چون مشخصات مصالح، عرض پل، تعداد شاهتیرها و الگوی بارگذاری در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

1. Earnshaw, S., “On the mathematical theory of sound”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 150, pp. 133-148, (1860).
2. Lamb, H., “Hydrodynamics”, Cambridge University Press, Cambridge, (1895).
3. Hopkinson, B., “British Ordnance Board Minutes Report No. 13565”, (1915).

4. Taylor, G. I., "Notes on the Dynamics of Shock Waves from Bare Explosive Charges", Paper written for Civil Defense Research Committee Paper, UK Ministry of Home Security, (1940).
5. Taylor, G. I., "The Propagation and Decay of Blast Waves", Paper written for Civil Defense Research Committee Paper, UK Ministry of Home Security, (1941).
6. Taylor, G. I., "The Propagation of Blast Waves over the Ground", Paper written for Civil Defense Research Committee Paper, UK Ministry of Home Security, (1941).
7. Department of Defense (DoD), "Structures to resist effect of accidental explosions (TM-5-1300)", US Department of the Army Navy and Air Force, Washington (DC), (1990).
8. Department of Defense (DoD), "Fundamental of protective design for conventional weapons (TM-5-855-1)", US Department of the Army Navy and Air Force, Washington (DC), (1986).
9. Federal Management Agency, "Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings (FEMA 426)",FEMA, Washington (DC), (2003).
10. Federal Management Agency, "Primer for Design of Commercial Building to Mitigate Terrorist Attacks (FEMA 427)",FEMA ,Washington (DC), (2003).
11. Federal Management Agency, "Primer to Design Safe School Projects in Case of Terrorist Attacks (FEMA 428)",FEMA, Washington (DC), (2003).
12. American Society of Civil Engineers (ASCE),"Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects (Manual NO 42)",ASCE, New York, (1985).
13. American Society of Civil Engineers (ASCE),"Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities", ASCE, New York, (1997).
14. American Society of Civil Engineers (ASCE),"Structural Design for Physical Security: State of the Practice", ASCE, Reston, VA, (1999).
15. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "Bridge Security Guidelines, AASHTO, Washington (DC), (2011).
16. Yazdani, N., Anwarul Islam, A. K. M., "Performance of AASHTO girder bridges under blast loading", Engineering Structures, Vol. 30, pp. 1922-1937, (2008).
17. Fujikara, S., Bruneau, M., "Blast resistant of seismically designed bridge piers", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, (2008).
18. Abdelahad, F. A., Arockiasamy, M., "Analysis of Blast/Explosion Resistant Reinforced Concrete Solid Slab and T-beam bridges", MSc Thesis, Florida University, (2008).
19. Deng, R. B., Jin, X. L., "Numerical Simulation of Bridge Damage under Blast Loads", WSEAS Transactions on Computers, Vol. 9, pp. 1564-1574, (2009).
20. Tokal-Ahmed, Y. M., Najm, H. S., "Response of Bridge Structures Subjected to Blast Loads and Protection Techniques to Mitigate the Effect of Blast Hazards on Bridges", PhD Thesis, State University of New Jersey, (2009).
21. Zhou, F., Arockiasamy, M., "Blast/Explosion Resistant Analysis of Composite Steel Girder Bridge System", MSc Thesis, Florida University, (2009).
22. Tang, E. K. C., Hao, H., "Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part I:Model development and response calculations", *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 3180-3192,

(2010).

23. Son, J., Lee, H. J., “Performance of cable-stayed bridge pylons subjected to blast loading”, *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 1133-1148,(2011).

24. Bodaghi, M., Damanpack, A. R., Aghdam, M. M., Shakeri, M., “Non-linear active control of FG beams in thermal environments subjected to blast loads with integrated FGP sensor/actuator layers”, Composite Structures, Vol. 94 (12), pp. 3612–3623, (2012).

25. Nassr, A. A., GhaniRazaqpur, A., Tait, M. J., Campidelli, M., Foo, S., “Strength and stability of steel beam columns under blast load”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.55, pp. 34–48, (2013).

26. Carta, G., Stochino, F., “Theoretical models to predict the flexural failure of reinforced concrete beams under blast loads”, *Engineering Structures*, Vol. 49,pp. 306–315, (2013).

27. American Association of State Highway and transportation Officials (AASHTO), “Recommendation for Bridge and Tunnel Security”, AASHTO Blue Ribbon Panel on Bridge and Tunnel Security, (2003).

28. ABAQUS 6.10 User Manual, ABAQUSInc., (2010).

29. Chung, W., Sotelino, E. D., “Nonlinear Finite-Element Analysis of Composite Steel Girder Bridges”, *ASCE journal of structural engineering*, Vol. 131(2),pp. 304-313, (2005).

30. Kathol, S., Azizinamini, A., Luedke, J., “Strength capacity of steel girder bridges”, Nebraska Department of Roads (NDOR) Research Project No.RES1 90099, Nebraska Department of Roads, Lincoln, NE, (1995).